

# **PROPRIEDADES DO ASIC DA SIDERURGIA NACIONAL E POSSIBILIDADES DA SUA UTILIZAÇÃO EM OBRA - UMA PERSPECTIVA GEOMECÂNICA**

SANDRA FERREIRA

*BOLSEIRA DE INVESTIGAÇÃO DA FCT/SN*

ANTÓNIO GOMES CORREIA

*PROFESSOR CATEDRÁTICO DA UNIVERSIDADE DO MINHO*

ANTÓNIO JOSÉ ROQUE

*INVESTIGADOR DO LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL*

FERNANDO CASTRO

*ADMINISTRADOR DO CENTRO PARA A VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS*

ANTÓNIO CAVALHEIRO

*ASSESSOR DA ADMINISTRAÇÃO DA SIDERURGIA NACIONAL*

## **RESUMO**

Para avaliar a viabilidade de utilização dos ASIC (Agregado Siderúrgico Inerte para Construção) produzidos pela Siderurgia Nacional, em obras geotécnicas, estudam-se em laboratório as suas propriedades mineralógicas, químicas, geométricas, físicas e mecânicas. Neste trabalho apresentam-se os resultados obtidos para as propriedades físicas e mecânicas, em particular a rigidez estudada através de um equipamento triaxial de precisão. Os resultados são comparados com os obtidos em materiais especificados para as camadas de base dos pavimentos, quer em Portugal, quer em França (agregados granítico 0/31,5 e calcário 0/19, respectivamente). Da comparação dos resultados conclui-se que os ASIC apresentam propriedades mecânicas superiores às dos agregados naturais. Estes resultados enfatizam que os ASIC nacionais podem ser utilizados nas infra-estruturas de transporte.

## **1. INTRODUÇÃO**

Está em curso actualmente um projecto nacional, onde se estão a estudar as escórias de aciaria produzidas a nível nacional pela Siderurgia Nacional (SN) valorizadas pela adequação ao uso dos Agregados Siderúrgicos Inertes para Construção (ASIC) obtidos da componente não metálica que resulta do seu processamento. Refira-se que a SN estima a produção anual de escórias de aciaria em cerca de 270 000t, nos seus fornos de arco eléctrico do Seixal e da Maia, e a gestão deste importante volume de resíduos constitui uma fonte de preocupação para a Empresa e para o País. É neste quadro que a SN apoia um Projecto de I&D, que decorre no período 2005-2009, intitulado, “Aplicação de resíduos em infra-estruturas de transporte e obras geotécnicas – Valorização de escórias de aciaria”. Este projecto pretende contribuir para a criação de uma metodologia mecanicista e ambiental que promova a reutilização de resíduos, em geral, e do ASIC em particular.

Seguindo as recomendações mais relevantes dos projectos da Comunidade Europeia (COURAGE 1999, ALT-MAT 1999 e SAMARIS 2005), este projecto dá prioridade aos ensaios de laboratório relacionados com as propriedades ambientais, as quais são relevantes

para os materiais não naturais, e de engenharia, bem como os ensaios em campo, envolvendo monitorização. Até ao momento realizaram-se todos os ensaios de laboratório relacionados com as propriedades de engenharia e ambientais. De forma a calibrar os resultados de laboratório e avaliar o desempenho “in situ” dos materiais naturais e dos ASIC, foi construído um trecho experimental com diferentes secções instrumentadas, na estrada nacional EN311 entre Fafe e Várzea Cova. A avaliação do desempenho ambiental está a ser realizada através da análise química dos lixiviados recolhidos nos lisímetros, construídos na base do aterro do trecho experimental.

Para avaliar a viabilidade de utilização dos ASIC, produzidos pela SN (designados de ASIC do Seixal e ASIC da Maia), em obras geotécnicas e muito particularmente nas infra-estruturas de transporte, implementou-se um vasto programa de estudo experimental onde se estudaram as propriedades mineralógicas, químicas (ASIC e análise dos lixiviados, perda ao rubro e ensaio de sulfato de magnésio), geométricas (granulometria, índice de forma e de alongamento), físicas e mecânicas (equivalente de areia, azul de metileno, limites de Atterberg, resistência à fragmentação - Los Angeles, resistência ao desgaste - Micro-Deval, peso específico, absorção de água, CBR/compactação leve, CBR/compactação pesada, compressão triaxial, triaxiais de precisão, fragmentabilidade, degradabilidade, compressão triaxial consolidada não drenada para amostras com 300mm de diâmetro, compressão unidimensional para amostras de 500mm de diâmetro, esmagamento e carga pontual).

O objectivo deste estudo foi o de comparar os valores obtidos para os ASIC, com os valores referidos nas especificações nacionais para os materiais naturais que possuem características adequadas para a sua aplicação em infra-estruturas de transporte. Alguns destes resultados, designadamente as propriedades ambientais (análise química dos ASIC e dos lixiviados) e de engenharia (granulometria, limites de Atterberg), foram já apresentados por Roque et al., 2006. É importante salientar que, relativamente às propriedades ambientais os ASIC foram classificadas na categoria dos resíduos inertes.

Neste artigo são apresentados os resultados obtidos em laboratório relacionados com as propriedades físicas e mecânicas, muito particularmente a rigidez, para os dois ASIC. A rigidez dos ASIC compactados foi estudada através de um equipamento triaxial de precisão, presente no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho. Os resultados são comparados com os obtidos em materiais especificados para as camadas estruturais dos pavimentos, quer em Portugal (agregado granítico 0/31,5), quer em França (agregado calcário 0/19). Num segundo trabalho, publicado neste congresso, apresentam-se as propriedades dos ASIC e a viabilidade técnica da sua aplicação em infra-estruturas de transporte e obras geotécnicas numa perspectiva geoambiental.

## **2. MATERIAL, EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTO DE ENSAIO**

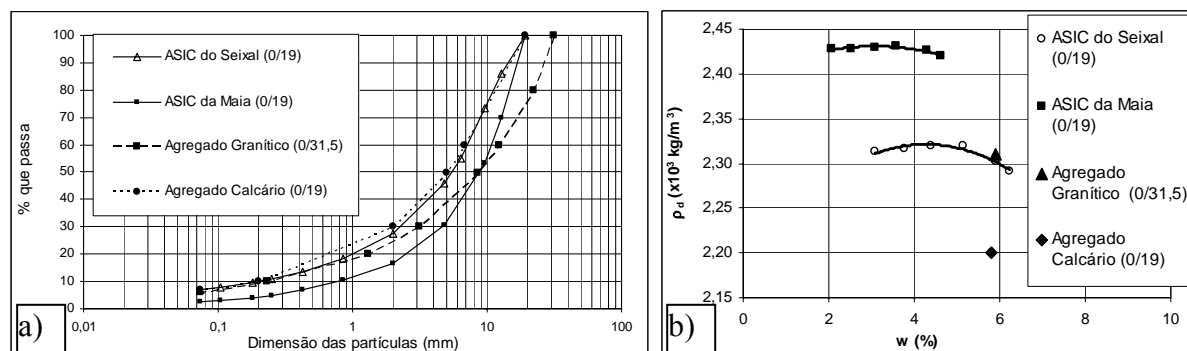
### **2.1. Material**

Os ensaios foram realizados sobre dois ASIC produzidos pela SN, designados de ASIC da Maia e ASIC do Seixal. Os detalhes da obtenção dos ASIC foram apresentados por Roque et al., 2006. Os resultados relativos à rigidez são comparados com os obtidos em materiais especificados para as camadas estruturais dos pavimentos (agregado granítico 0/31,5 e agregado calcário 0/19). No Quadro 1 apresentam-se, para todos os materiais, as características das curvas granulométricas e os resultados do ensaio Proctor modificado. Na

Figura 1-a) apresentam-se as curvas granulométricas e na Figura 1-b) as curvas obtidas do ensaio Proctor modificado.

**Quadro 1 – Características geométricas das curvas granulométricas e valores encontrados para o ensaio Proctor modificado**

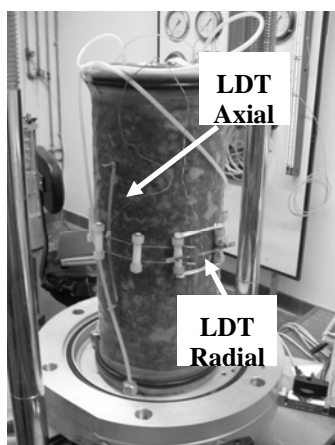
Material	Características Geométricas							Proctor modificado	
	D <sub>max</sub> (mm)	D <sub>10</sub> (mm)	D <sub>30</sub> (mm)	D <sub>50</sub> (mm)	D <sub>60</sub> (mm)	C <sub>u</sub>	C <sub>c</sub>	ρ <sub>d</sub> (10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> )	w (%)
ASIC do Seixal (0/19)	19,1	0,20	2,20	5,30	7,10	36	3,4	2,32	5,00
ASIC da Maia (0/19)	19,1	0,84	4,60	8,80	11,00	13	2,3	2,43	3,45
Agregado Granítico (0/31,5)	31,5	0,23	3,11	8,46	12,14	53	3,5	2,31	5,90
Agregado Calcário (0/19)	19,1	0,20	2,00	5,00	6,80	34	2,9	2,20	5,80



**Figura 1 a) - Curvas granulométricas; -b) – Curvas do ensaio Proctor modificado para os ASIC da Maia e do Seixal e valores encontrados para os agregados naturais**

## 2.2. Equipamento

As características de deformabilidade dos ASIC são avaliadas através de ensaios triaxiais de precisão, com o equipamento existente no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho. Este equipamento está instrumentado internamente e as deformações radiais e axiais são medidas localmente através de 3 LDT's (Local Deformation Transducer) verticais e um LDT horizontal. Os LDT's foram construídos na Universidade do Minho. Estes transdutores foram inicialmente desenvolvidos por Goto et al., 1991, na Universidade de Tóquio. O equipamento triaxial está ainda instrumentado com uma célula de carga interna e um transdutor de pressão. Na Figura 2 apresenta-se uma fotografia onde se mostra os transdutores de deslocamento utilizados.



**Figura 2 – Equipamento triaxial de precisão**

### 2.3. Preparação das amostras

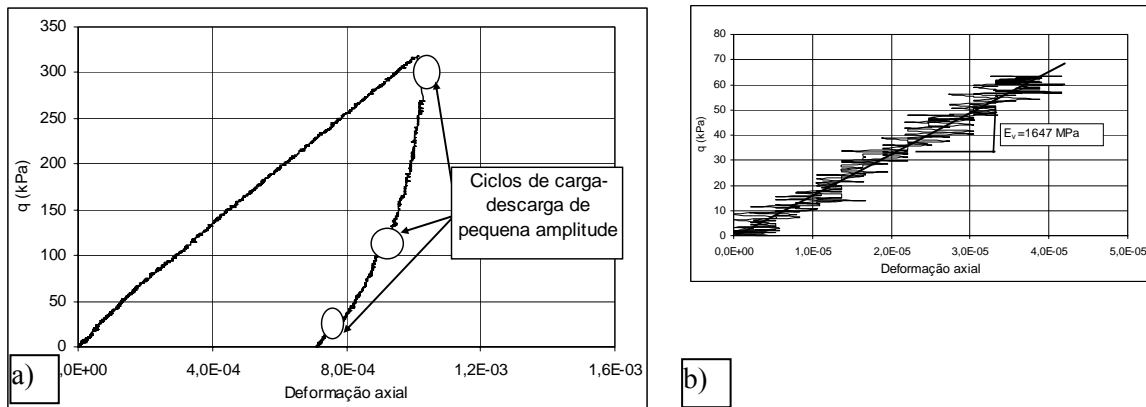
O procedimento de preparação das amostras é o mesmo em todos os ensaios: os ASIC são peneirados para eliminar a presença dos elementos indesejados (superiores a 19,1mm), de seguida é misturado com a quantidade de água necessária e colocada num saco plástico fechado por um período de 24 horas para que se estabeleça o equilíbrio hídrico. As amostras foram compactadas em 6 camadas através de um martelo vibrante com um peso estático com cerca de 7kg e uma base com 146mm de diâmetro. O tempo de vibração em cada camada é controlado através da densidade seca pretendida para as amostras. As dimensões das amostras ensaiadas são de 150mm de diâmetro e 300mm de altura. No Quadro 2 apresentam-se as características de compactação das amostras, e como se pode verificar os materiais são compactados para um estado muito denso, representativo dos valores encontrados nos pavimentos.

**Quadro 2 - Características de compactação das amostras**

Material	$\rho_d$ ( $\times 10^3$ kg/m <sup>3</sup> )	w (%)	Gs	e
ASIC do Seixal	2,31	5,8	3,07	0,330
ASIC da Maia	2,43	3,5	3,26	0,343

### 2.4. Procedimento de ensaio

O procedimento de ensaio usado no estudo das características de deformabilidade dos ASIC utiliza várias tensões. Para cada tensão de confinamento (100, 200 e 300kPa) e após a consolidação, os ensaios iniciam-se com uma aplicação de carregamento deviatório até cerca de  $1 \times 10^{-3}$  da deformação axial, de forma a se obter o decaimento das curvas do módulo de deformabilidade com o nível de deformação. A velocidade de carregamento é cerca de 0,03mm/min. Durante o processo de descarga foram realizados ciclos de carga/descarga de tensão vertical de muito pequena amplitude para diferentes níveis de tensão de desvio (aproximadamente para o valor de tensão máxima de desvio que foi aplicada à amostra ( $q_{max}$ ), para  $q_{max}/2$  e  $q$  próximo de 0kPa). Na Figura 3-a) apresenta-se um exemplo do procedimento de ensaio, para uma dada tensão de confinamento. Para cada nível foram aplicados cinco ciclos de carga/descarga de pequena amplitude. A amplitude é controlada de forma a se garantir que os ciclos são fechados e lineares, para se avaliar o módulo de deformabilidade elástico (ver Figura 3-b).



**Figura 3 a) – Exemplo do procedimento de ensaio para uma determinada tensão de confinamento; b) Exemplo de um ciclo de carga/descarga de pequena amplitude**

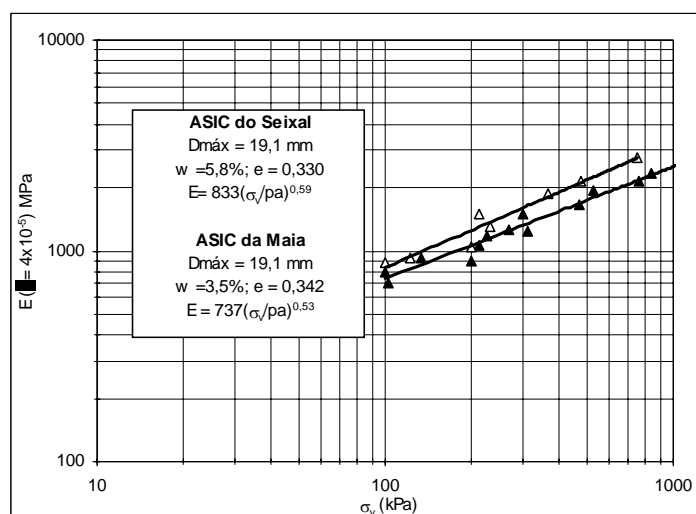
### 3. RESULTADOS DOS ENSAIOS

Os valores do módulo de deformabilidade foram calculados a partir da tensão de desvio dividida pela deformação axial, como ilustrado na Figura 3-b). Estudos anteriores (Hoque e Tatsuoka, 1998 e Gomes Correia et al., 2001) mostraram que o módulo de deformabilidade no domínio das pequenas deformações ( $E_v$ ) é definido por uma lei potência, a qual não inclui a tensão lateral,  $\sigma_h$ , como variável (ver equação 1). A lei potência que descreve tal comportamento é dada pela equação (1).

$$E_v = C \left( \frac{\sigma_v}{p_a} \right)^n \quad (1)$$

Os resultados dos ensaios, para um nível de deformação axial de  $4 \times 10^{-5}$ , são apresentados na Figura 4. A análise dos resultados é feita em tensões totais e os valores foram normalizados para uma pressão  $p_a$  de valor 100kPa. Como podemos verificar a análise em tensões totais conduz a uma potência  $n$  de valor igual a 0,6 e 0,52 para os ASIC do Seixal e da Maia, respectivamente. Estes valores, para a potência, são similares aos normalmente encontrados para os materiais naturais, que rondam os 0,5. A partir do gráfico pode-se também verificar que os valores encontrados para o módulo de deformabilidade são muito elevados quando comparados com os dos materiais naturais, pelo que estes resultados revelam um comportamento mecânico excelente para os ASIC produzidos na SN.

No Quadro 3 apresenta-se, de uma forma sucinta, alguns dos resultados obtidos para os ASIC do Seixal e da Maia relativamente às propriedades físicas e mecânicas. Da análise do Quadro 3 verifica-se que, globalmente, os valores encontrados para os dois ASIC são relativamente semelhantes.



**Figura 4 – Evolução do módulo de deformabilidade com a tensão vertical total**

**Quadro 3 - Propriedades obtidas para os ASIC do Seixal e da Maia**

			Valor	
Propriedades	Parâmetros		ASICdo Seixal	ASIC da Maia
Físicas	Equivalente de areia - EA (%)		80	100
	Valor de azul de metileno - VBS (%)		0	0
	Limites de Atterberg		NP	NP
	Massa volúmica	material impermeável (x10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> )	3,31	3,45
		partículas saturadas (x10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> )	3,05	3,25
		partículas secas (x10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> )	2,94	3,17
	Absorção de água (%)		3,87	2,59
	Densidade das partículas - Gs		3,07	3,26
Mecânicas	Los Angeles – LA (%)		23	28
	Micro-Deval (%)		11	11
	Proctor modificado	Massa volúmica seca máxima – ρ <sub>dOPM</sub> (10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> )	2,32	2,43
		Teor em água - w <sub>OPM</sub> (%)	5,0	3,45
	California bearing ratio - CBR	Imediato (%)	100	72
		Embebido (%)	51	48
		Expansibilidade (%)	0	0

#### 4. COMPARAÇÕES ENTRE OS ASIC E OS AGREGADOS NATURAIS

Os resultados obtidos para as propriedades mecânicas, designadamente a rigidez, são comparados com os obtidos num agregado granítico (0/31,5) e um agregado calcário (0/19).

Estes materiais foram já utilizados em camadas de base nos pavimentos, em Portugal (agregado granítico 0/31,5), e em França (agregado calcário 0/19).

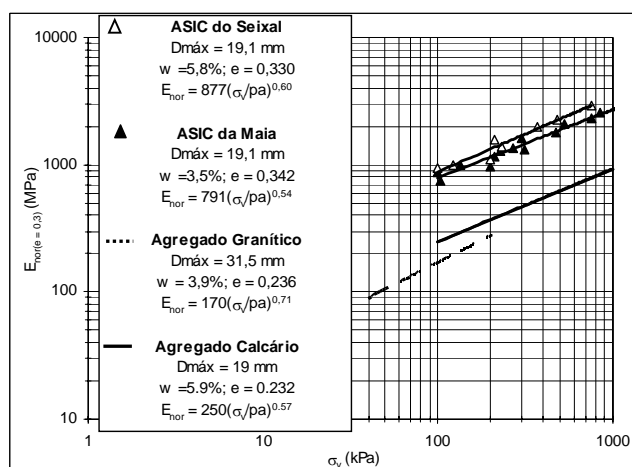
Os resultados apresentados para o agregado granítico (0/31,5) foram obtidos por Gomes Correia et al. (2001) e referem-se a uma amostra compactada para uma densidade seca de  $2,19 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  e um teor em água de 3,9%. Os resultados apresentados para o agregado calcário (0/19) foram obtidos por Coronado et al. (2004, citado por Gomes Correia, 2004) e os resultados apresentados referem-se a uma amostra compactada para uma densidade seca de  $2,13 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  e um teor em água de 3,9%. As características de deformabilidade de ambos os materiais foram estudadas através de um equipamento triaxial de precisão e as deformações axiais e radiais foram obtidas com recurso a LDT's.

Para se proceder à comparação, os resultados dos ensaios dos quatro materiais foram corrigidos para eliminar o efeito do índice de vazios inicial e normalizados para um índice de vazios de valor igual a 0,3. O valor normalizado foi calculado utilizando a equação (2), onde  $f(e)$  é a função de índice de vazios e  $E^*$  é o valor medido na amostra. A função de índice de vazios utilizada para se proceder à normalização foi a proposta por Iwasaki et al., 1978, cuja equação é dada pela equação (3).

$$E = E^* \frac{f(0,3)}{f(e)} \quad (2)$$

$$f(e) = \frac{(2,17 - e)^2}{1 + e} \quad (3)$$

Na Figura 5 apresentam-se os resultados obtidos do módulo de deformabilidade em função da tensão total, após a referida normalização. Como se pode verificar da figura, os valores encontrados para o módulo de deformabilidade dos ASIC são muito superiores aos encontrados nos agregados naturais (cerca de 4 vezes superior aos valores encontrados para o agregado granítico 0/31,5). Isto revela, quanto às características mecânicas, que os ASIC exibem melhores propriedades do que os materiais naturais especificados para as camadas de base. Estes resultados, conjuntamente com os apresentados por Gomes Correia et al., 2005, Gomes Correia et al., 2006 e Roque et al., 2006, enfatizam que os ASIC nacionais podem ser utilizados em obras geotécnicas, e muito particularmente nas infra-estruturas de transporte (taludes, camadas de leito de pavimento e de base).



**Figura 5 – Comparação da rigidez dos ASIC com os agregados naturais**

## 5. CONCLUSÕES

Este estudo contribui técnica e cientificamente para a aplicação do desenvolvimento dos princípios da sustentabilidade à construção, especialmente às obras geotécnicas. O trabalho de investigação promove em particular a utilização dos ASIC como um substituto dos materiais tradicionais aplicados na construção das infra-estruturas de transporte, contribuindo para a preservação de fontes naturais (materiais naturais) e para a redução dos volumes de resíduos a serem depositados em aterros.

Quanto às propriedades físicas e mecânicas podemos concluir que os ASIC são materiais não plásticos e com uma massa volúmica seca máxima elevada (da ordem dos  $2,3$  a  $2,4 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>) e um teor em água óptimo baixo (entre 3,5 a 5%) correspondentes a uma energia de compactação pesada. Os valores de CBR determinados com uma sobrecarga reproduzida por 3 placas e embebido durante 4 dias foram relativamente baixo (cerca de 50% para uma energia de compactação pesada), comparativamente com os valores normalmente encontrados para os agregados naturais, mas ainda assim substancialmente superiores aos valores habitualmente especificados nos cadernos de encargos para as camadas de sub-base, leito de pavimento e aterro. Trata-se de um material de boas resistências à fragmentação e ao desgaste, traduzidas por um valor de Los Angeles da ordem dos 25% e um valor de micro-Deval de 11%

Dos resultados apresentados verificou-se ainda, por um lado, que os ASIC nacionais apresentam um bom desempenho na compactação e, por outro, que a influência da tensão total vertical no módulo de deformabilidade, no domínio das muito pequenas deformações ( $E_v$ ), é descrita por uma lei potência, não incluindo a tensão lateral  $\sigma_h$  como variável, tal como acontece para os materiais naturais. Da análise dos resultados em tensões totais verificou-se também que o valor da potência  $n$  encontrada para os ASIC (0,6 para o ASIC do Seixal e 0,52 para o ASIC da Maia) é similar aos valores normalmente encontrados para os materiais naturais que rondam os 0,5.

Os resultados mostraram também que os ASIC nacionais têm propriedades mecânicas melhores do que os materiais especificados para a utilização em camadas de base (agregado granítico 0/31,5 e agregado calcário 0/19). Esses resultados enfatizam que os ASIC nacionais podem ser utilizadas em obras geotécnicas e muito particularmente nas infra-estruturas de transporte (aterro, camadas de leito de pavimento, sub-base e base). Contudo, é necessária a validação dos resultados laboratoriais, a qual está a ser realizada através de um trecho experimental, já construído na estrada nacional EN311 entre Fafe e Várzea Cova.

Este material poderá competir com os agregados naturais na construção das infra-estruturas de transporte ou outras obras geotécnicas, se forem encontrados benefícios económicos, os materiais satisfizerem as especificações ambientais e de engenharia, e o seu desempenho em campo for tão bom quanto o dos materiais tradicionais. Atendendo há experiência em outros países, bem como dos dados técnicos já obtidos no âmbito do projecto (Gomes Correia et al., 2005 e Gomes Correia et al., 2006) há razões para esperar que esses requisitos sejam preenchidos pelos ASIC da SN. É ainda de referir que, os resultados obtidos para os ASIC até ao momento permitiram a sua utilização como material de aterro e de leito de via, num ramal ferroviário que liga a Siderurgia Nacional do Seixal à Rede Ferroviária Nacional.



## AGRADECIMENTOS

Os autores querem agradecer à SN e à FCT pelo suporte financeiro prestado a este projecto (POCI/ECM/56952/2004), através do Programa POCI 2010 e fundo comunitário FEDER.

## ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ASIC – Agregado Siderúrgico Inerte para Construção

SN – Siderurgia Nacional

CBR – California Bearing Ratio

C – Constante que depende do tipo de material

Cc – Coeficiente de curvatura

Cu – Coeficiente de uniformidade

D<sub>max</sub> – Dimensão máxima das partículas

D<sub>x</sub> – Dimensão da partícula correspondente a x (%) do material passado

e – Índice de vazios

E<sub>v</sub> – Módulo de deformabilidade vertical

E\* - Módulo de deformabilidade medido durante o ensaio

f(e) – Função do índice de vazios

Gs – Densidade das partículas sólidas

n – Potência

pa – Pressão de referência de valor igual a 100 kPa

w – Teor em água

ρ<sub>d</sub> – Densidade seca

σ<sub>h</sub> – Tensão horizontal total

σ<sub>v</sub> – Tensão vertical total

## REFERÊNCIAS

[1] - COURAGE – “Construction with unbound road aggregates in Europe.” Final report. 1999, 123 páginas.

[2] -ALT-MAT – “Alternative materials in road construction.” Project Founded by the European Commission under the Transport RTD Programme of the 4th Framework Programme, 1999.

[3] -SAMARIS – “Sustainable and advanced materials for road infrastructures.” Project Funded by the European Commission under the Transport RTD Programme of the 5th Framework Programme. 2005.

[4] -Roque A. J., Gomes Correia A., Fortunato E., Pardo de Santayana F., Castro F., Reis Ferreira S. M. e Trigo L. - “A Geotecnia na valorização de agregados siderúrgicos inertes reciclados – Um projecto nacional”, 12º Encontro Nacional do Saneamento Básico, Cascais, Portugal. 2006.

[5] -Goto S., Tatsuoka F., Shibuya S., Kim Y-S. e Sato T. - “A simple gauge for local small strain measurements in the laboratory.” Soils and Foundations, Vol. 31, Nº 1. 1991.169-180.

[6] -Hoque E. e Tatsuoka F. - “Anisotropy in the elastic deformation of materials”. Soils and Foundations, Vol. 38, Nº1. 1998.163-179.

[7] -Gomes Correia A., Anhdan L. Q., Koseki J. e Tatsuoka F. - “Small strain stiffness under different isotropic and anisotropic stress conditions of two granular granite materials.”

Advanced Laboratory Stress-Strain Testing of Geomaterials, Eds Tatsuoka, Shibuya and Kuwano, Balkema, Swets and Zeitlinger. 2001, 209-215.

[8] -Gomes Correia, A. - “Evaluation of mechanical properties of unbound granular materials for pavements and rail tracks”. Proc. of the International Seminar on Geotechnics in Pavements and Railway Design and Construction. Eds Gomes Correia e Loizos, Milpress. Rotterdam, 2004. 35-59.

[9] -Iwasaki T., Tatsuoka F. e Takagi Y. - “Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading”. Soils and Foundations, Vol 18, Nº 1. 1978.39-50.

[10] -Gomes Correia, A., Ferreira, S., Araújo, N., Castro, F., Trigo, L., Roque, A.J., Pardo de Santayana, F. e Fortunato, E. - “Estudo de viabilidade de aplicação de agregado siderúrgico inerte para construção (ASIC) em camadas de base, sub-base, leito de pavimento e aterro”. Relatório CVR 257/2005 Guimarães: CVR. 2005, 87 páginas.

[11] -Gomes Correia, A., Ferreira, S., Castro, F., Trigo, L., Roque, A.J., Pardo de Santayana, F. e Fortunato, E. - “Estudo de viabilidade de aplicação do agregado siderúrgico inerte para construção (ASIC) da Siderurgia Nacional do Seixal em camadas de base, sub-base, leito de pavimento e aterro. Comparação com as características do agregado da Siderurgia Nacional da Maia”. Relatório CVR 24/2006, Guimarães: CVR, 2006, 47 páginas.